

0-772964

На правах рукописи

ДУМИН Юрий Викторович

**ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННОГО
ПЛАЗМЕННОГО ОБЛАКА В ИОНОСФЕРЕ
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗЛЕТА**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Троицк – 2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте
земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Бадин Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Белый Вячеслав Владимирович

доктор физико-математических наук
Романовский Михаил Юрьевич

Ведущая организация: Государственный Научный Центр
Российской Федерации
“Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований”

Защита состоится 2 декабря 2008г. в 11:00 на заседании диссертационного
совета Д 002.237.01 при ИЗМИРАН по адресу: 142190 г. Троицк Москов-
ской обл, ИЗМИРАН. (Проезд от ст. метро “Теплый Стан” авт. № 531, 508,
512, 515 или 398 до остановки “ИЗМИРАН”).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан 30 октября 2008г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000438947

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.237.01
доктор физико-математических наук

Михайлов Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из наиболее важных явлений, наблюдаемых при искусственных выбросах плазмообразующих веществ в ионосферу и магнитосферу Земли, является генерация широкого спектра волновых возмущений, изучение которых интересно как само по себе, так и с точки зрения индуцированных ими процессов. Это, например, возбуждение ионосферно-магнитосферного альвеновского резонатора с сопутствующим высыпанием высокоэнергичных частиц, раскачка электростатических колебаний, которые могут приводить к дополнительной ионизации плазмы (так называемый эффект критической ионизационной скорости) и т.д.

Большинство электродинамических моделей искусственного плазменного облака, разработанных к настоящему времени, предназначены для его описания на сравнительно больших временах после момента инжекции. Гораздо меньше внимание было уделено динамике плазмы на ранней стадии расширения. Именно этому кругу вопросов и посвящена диссертация. Акцент сделан, в частности, на разработке эффективной математической методики, позволяющей проследить в явном виде зависимость генерируемых электрических полей и токов от параметров плазмы и характера ее движения, что открывает возможности для оптимизации активных космических экспериментов.

Еще один важный аспект диссертации – более аккуратный расчет параметров ионизованного газа на самой ранней стадии расширения. Из-за возможности возникновения сильно-неравновесных состояний (в частности, со значительной кулоновской неидеальностью), электрические характеристики такого газа могут сильно отличаться от “классических” и, тем самым, требуют специального теоретического анализа.

Цель работы:

1. Разработать аналитические или полуаналитические методы расчета генерации электрических полей и токов разлетающимся облаком плазмы, которые, в частности, могли бы достаточно эффективно использоваться и для оптимизации активных космических экспериментов (т.е., например, определения параметров плазмы, при которых достигается максимальная амплитуда возмущений).

2. Изучить физические процессы на самой ранней стадии разлета облака (порядка одной миллисекунды от момента инжекции), которые могут оказывать существенное влияние на параметры плазмы (прежде всего, ее электропроводность), определяющие характеристики генерируемых электромагнитных возмущений.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан метод построения аналитических решений уравнений динамо-эффекта, создаваемого сферически-симметричным однородным облаком на начальной (инерционной) стадии разлета, при любой степени анизотропии электропроводности плазмы (т.е. при произвольном соотношении между коэффициентами продольной, перекрестной и холловской проводимости).

2. С помощью вышеупомянутого метода найдены точные решения уравнений динамо-эффекта для конкретных типов граничных условий на поверхности разлетающегося облака.

3. Установлено, что при определенных соотношениях между термодинамическими и кинетическими параметрами инжектируемого газа плазма вскоре после момента образования может перейти и в течение некоторого времени существовать в состоянии с сильной кулоновской неидеальностью.

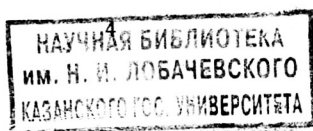
4. Предложен метод приближенного вычисления функции распределения электронов в режиме сильной связи, и на основе этой функции сделаны оценки концентрации свободных носителей заряда и других свойств сильно-неидеальной плазмы.

Научная и практическая ценность работы:

1. Основным достоинством развитого в диссертации метода решения уравнений динамо-эффекта (в частности, по сравнению с численными решениями) является возможность легко проследить зависимость полей и токов, генерируемых в заданной точке пространства, от всех параметров, фигурирующих в исходных уравнениях. Это открывает возможность, с одной стороны, проводить оптимизацию активных космических экспериментов по требуемым параметрам, а с другой стороны, могло бы послужить в будущем основой для построения эффективной методики решения обратной задачи динамо-эффекта, т.е. нахождения коэффициентов электропроводности (а через них и других характеристик плазмы) по измеряемым радиофизическими методами электрическим полям и токам.

2. Установленная в диссертации возможность перехода искусственно инжектированной в космическое пространство плазмы в состояние с большим параметром кулоновской связи (на некотором временном интервале вскоре после момента инъекции) может служить еще одним, наряду с развитием плазменной турбулентности, механизмом формирования аномальных электрических свойств плазмы.

3. Найденная в диссертации эффективная функция распределения электронов в режиме сильной кулоновской неидеальности и основанная на



ней методика вычисления концентрации свободных носителей заряда и других характеристик сильно-неидеальной плазмы может быть успешно применена как для описания активных экспериментов в космосе, так и для интерпретации лабораторных экспериментов с ультрахолодной плазмой в магнито-оптических ловушках, которые стали активно проводиться в последние несколько лет.

На защиту выносятся:

1. Методика аналитического решения уравнений динамо-эффекта в однородно расширяющемся плазменном шаре с произвольной степенью анизотропии электропроводности, основанная на разложении по обобщенной системе сферических функций.

2. Классификация возможных типов временного поведения параметра кулоновской неидеальности плазмы Γ_e на начальной стадии разлета в зависимости от кинетических и термодинамических параметров газа.

3. Метод построения эффективной функции распределения электронов в состоянии с сильной кулоновской неидеальностью; оценки концентрации свободных носителей заряда и других характеристик сильно-неидеальной плазмы с помощью этой функции распределения.

Обоснованность и достоверность результатов:

1. Достоверность выносимых на защиту результатов, связанных с исследованием трехмерной задачи динамо-эффекта, основана на том, что они представляют собой точные решения уравнений динамо-эффекта, справедливость которых легко может быть проверена непосредственной подстановкой в исходные уравнения.

2. Обоснованность моделей, используемых при исследовании перехода плазмы в сильно-неидеальное состояние, а также свойств плазмы в таком состоянии, подтверждается, прежде всего, результатами лабораторных экспериментов с аналогичными состояниями плазмы в магнито-оптических ловушках. Это, в частности, – измерения предельных значений параметра кулоновской неидеальности [C.E. Simien, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, v.92, p.143001 (2004)] и закона изменения со временем температуры электронов в холодной, свободно расширяющейся плазме [R.S. Fletcher, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, v.99, p.145001 (2007)].

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференции “Space Radiation Environment Modeling: New Phenomena and Approaches” (НИИЯФ МГУ, Москва, 1997 г.), международной зимней школе-симпозиуме “Коуровка-98” (Кыштым, Челябинская обл., 1998 г.), международном симпозиуме “Space Plasma Studies

by In-Situ and Remote Measurements” (ИКИ РАН, Москва, 1998 г.), 2-й международной конференции “Problems of Geocosmos” (СПбГУ, Санкт-Петербург, 1998 г.), XXVI Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, Московская обл., 1999 г.), международной научной конференции “Дифференциальные и интегральные уравнения” (Чебаркуль, Челябинская обл., 1999 г.), II международной конференции “Low Temperature Physics in Microgravity Environment” (Черноголовка, Московская обл., 1999 г.), конференции “Physics of Space: Growth Points and Problems” (Парижская обсерватория, Франция, 2000 г.), 33-й научной ассамблее COSPAR (Варшава, Польша, 2000 г.), XXIII международном коллоквиуме “Group Theoretical Methods in Physics” (ОИЯИ, Дубна, Московская обл., 2000 г.), коллоквиуме “Космические взрывы” (ГАИШ МГУ, Москва, 2000 г.), европейской конференции “Hypersonic and Aerothermic Flows and Shocks, and Lasers: Plasma-Radiation-Surface Interactions” (Парижская обсерватория, Франция, 2001 г.), XXV международной конференции “Phenomena in Ionized Gases” (Нагоя, Япония, 2001 г.), международном семинаре “Formation of Correlations: Non-equilibrium Physics at Short Time Scales VII” (Физический центр Бал-Хоннеф, Германия, 2002 г.), европейской конференции “Hyperbolic Models in Astrophysics and Cosmology” (Математический институт им. И. Ньютона, Кембридж, Великобритания, 2003 г.), осеннем колледже по физике плазмы “Long-Lived Structures and Self-Organization in Plasmas” (Международный центр теоретической физики им. А. Салама, Триест, Италия, 2003 г.), международной конференции и семинаре “Rydberg Physics” (Институт физики комплексных систем им. М. Планка, Дрезден, Германия, 2004 г.), 35-й научной ассамблее COSPAR (Париж, Франция, 2004 г.), трех международных конференциях “Atomic Physics” (Институт физики комплексных систем им. М. Планка, Дрезден, Германия, 2005, 2006 и 2007 гг.), летнем колледже по физике плазмы “New Developments” (Международный центр теоретической физики им. А. Салама, Триест, Италия, 2007 г.) и конференции “Turbulent Mixing and Beyond” (Международный центр теоретической физики им. А. Салама, Триест, Италия, 2007 г.).

Кроме того, материалы диссертации докладывались и обсуждались на рабочих семинарах в ИЗМИРАН (Троицк, Московская обл.), ГАИШ МГУ (Москва) и Калифорнийском университете (Лос-Анджелес, США).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 работ, 13 основных публикаций приведены в конце автореферата; из них в журналах, входящих в список ВАК, опубликовано 10 статей.

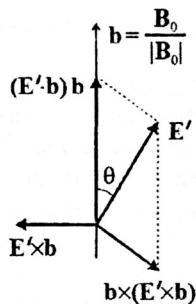
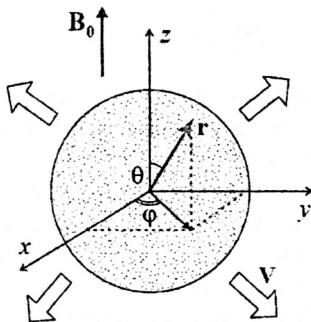
Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка цитированной литературы. Работа содержит 108 страниц печатного текста, в том числе 11 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 74 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, в частности, отмечена актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, аргументирована ее научная новизна, научная и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Далее перечислены научные конференции и семинары, на которых проводилась апробация различных аспектов работы, разъяснено, каков личный вклад автора и его соавторов в представленные в диссертации результаты, описана структура и объем работы и резюмировано ее содержание по главам.

В первой главе изложена история активных плазменных экспериментов в околоземном космическом пространстве. Ввиду обширности обсуждаемой темы основной акцент сделан на двух ее аспектах. Во-первых, это – самые первые эксперименты по искусственной инжекции (с конца 1940-х до конца 1960-х годов), которые положили начало данной области исследований и привлекли в то время значительное внимание всего физического и геофизического сообщества. И, во-вторых, это – ряд более поздних экспериментов, проводившихся в (или с участием) СССР и России в 1980-е и 1990-е годы, а также наиболее интересные иностранные работы.

Вторая глава занимает центральное место в диссертации. Она посвящена рассмотрению динамо-процессов в искусственном плазменном облаке на ранней стадии его разлета (т.е. когда механическим воздействием со стороны окружающего газа можно пренебречь). При этом основное внимание уделено исследованию “электростатической” моды возмущений, так как именно она наиболее существенна для таких процессов активного воздействия на ионосферу и магнитосферу, как ускорение заряженных частиц, генерация продольных токов и т.п. Особый акцент сделан на нахождении аналитических решений, позволяющих проследить в явном виде зависимость генерируемых полей и токов от фигурирующих в электродинамических уравнениях параметров (прежде всего, коэффициентов электропроводности плазмы, а также скорости разлета и размеров облака). Наличие таких зависимостей является полезным инструментом при планировании и оптимизации активных космических экспериментов, а в перспективе может послужить основой и для разработки строгой математической методики решения обратной задачи динамо-эффекта, т.е. нахождения



параметров плазмы по регистрируемым радиофизическими методами электромагнитным возмущениям от разлетающегося облака.

Для описания динамо-эффекта в “квазистационарном” приближении (т.е. когда токами смещения пренебрегается) используется система уравнений, включающая в себя:

- 1) стационарное уравнение непрерывности электрического тока

$$\nabla \mathbf{j} = 0; \quad (1)$$

- 2) обобщенный закон Ома, выражающий плотность тока \mathbf{j} через продольную σ_0 , педерсеновскую σ_p и холловскую σ_H проводимости

$$\mathbf{j} = \sigma_0 (\mathbf{E}' \cdot \mathbf{b}) \mathbf{b} + \sigma_p (\mathbf{b} \times (\mathbf{E}' \times \mathbf{b})) - \sigma_H (\mathbf{E}' \times \mathbf{b}); \quad (2)$$

- 3) выражение для напряженности электрического поля \mathbf{E}' в системе координат, движущейся со скоростью \mathbf{V}

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}_0 / c, \quad \mathbf{E} = -\nabla \tilde{\varphi}, \quad (3)$$

где $\tilde{\varphi}$ – электрический потенциал, а \mathbf{B}_0 – напряженность внешнего магнитного поля.

Поле скоростей \mathbf{V} в сферическом однородно расширяющемся газовом облаке на начальной (инерционной) стадии разлета задается модельным выражением

$$V_r(r, t) = (u_0 / R(t)) r, \quad R(t) = R_0 + u_0 t \quad (4)$$

(условия его применимости обсуждаются в Приложении А).

Для конкретной геометрии плазменного облака, изображенной на рисунке, система уравнений (1)–(4) может быть сведена к единственному дифференциальному уравнению в частных производных для электрического потенциала:

$$\begin{aligned}
& (\sigma_0 - \sigma_p) \left[\xi^2 r^2 \tilde{\varphi}'' + 2(1 - \xi^2) \xi r \tilde{\varphi}' + (1 - \xi^2)^2 \tilde{\varphi} + \right. \\
& \left. + (1 - \xi^2) r \tilde{\varphi}' - 3(1 - \xi^2) \xi \tilde{\varphi} \right] + \\
& + \sigma_p \left[r^2 \tilde{\varphi}'' + (1 - \xi^2) \tilde{\varphi} + 2r \tilde{\varphi}' - 2\xi \tilde{\varphi} \right] = \\
& = 2\sigma_H (B_0 u_0 / cR) r^2,
\end{aligned} \tag{5}$$

где $\xi = \cos \theta$, штрих обозначает дифференцирование по r , а точка – по ξ .

Первоначально использованный нами подход был основан на разложении искомого решения $\tilde{\varphi}$ в ряд по степеням r , в результате чего уравнение (5) сводилось к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений для соответствующих угловых гармоник. Далее предполагалось численно решать некоторую подсистему этих уравнений для достаточно большого количества конкретных наборов фигурирующих в них параметров (прежде всего, коэффициентов электропроводности) и, наконец, использовать эти решения для построения аппроксимации $\tilde{\varphi}(r, \xi)$ во всем пространстве параметров.

Совершенно неожиданным фактом, выявившимся при численных расчетах, оказалась инвариантность спектра дифференциальных операторов для угловых гармоник, т.е. его независимость от фигурирующих в уравнениях параметров (хотя сами угловые гармоники, конечно же, существенно зависят от этих параметров). Более тщательное математическое исследование позволило дать строгое математическое доказательство этого факта и разработать на его основе метод построения точных решений уравнения динамо-эффекта (5) путем разложения по специально введенной системе базисных функций, названных нами “обобщенными сферическими функциями”. (Таким образом, использование каких-либо приближенных или численных методов стало ненужным.)

В общем виде вышеупомянутое решение записывается как

$$\begin{aligned}
\tilde{\varphi}(r, \xi) = & \frac{B_0 u_0 R}{c} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_p} \right) \times \\
& \times \left\{ \frac{1}{A+3} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \xi^k \sum_{n=k}^{\infty} c_n a_{nk} \left(\frac{r}{R} \right)^n \right\},
\end{aligned} \tag{6}$$

где $A = (\sigma_0 - \sigma_p) / \sigma_p$ – параметр анизотропии электропроводности плазмы, c_n – произвольные коэффициенты, определяемые граничными условиями на поверхности облака, и a_{nk} – коэффициенты, задающие обобщенные

сферические функции. Они могут быть вычислены по рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned} & (1 - \delta_{k0} - \delta_{k1}) A (n - k) (n - k + 2) a_{n,k-2} + \\ & + (n - k) [(2k + 1) A + (n + k + 1)] a_{nk} + \\ & + (k + 1) (k + 2) (A + 1) a_{n,k+2} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где δ_{k0} и δ_{k1} – дельта-функции Кронекера.

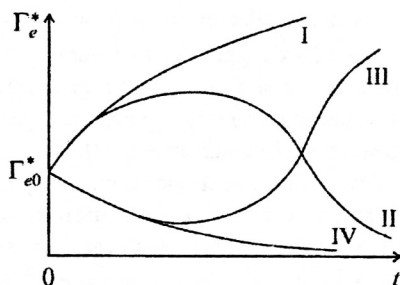
Соотношения (7) имеют гораздо более сложный вид, чем для обычных полиномов Лежандра, и, более того, содержат произвольный нецелочисленный параметр A . Тем не менее, как показано в тексте диссертации, вычисляемые по ним коэффициенты разложения a_{nk} обладают в точности теми же алгебраическими свойствами (в частности, $a_{nk} \equiv 0$ при $k > n$ и любом A). Благодаря этому, вся процедура решения уравнения динамо-эффекта в терминах обобщенных сферических функций оказывается в точности эквивалентной решению уравнения Лапласа путем разложения по обычным сферическим функциям. Примеры таких решений для конкретных граничных условий на поверхности облака приведены в конце данной главы.

Третья глава диссертации посвящена проблемам ионизационно-рекомбинационной динамики плазмы на начальной стадии разлета, когда возможны значительные отклонения от условий термодинамического равновесия (в первую очередь, по отношению к неупругим каналам взаимодействия между частицами). Рассмотрение этих вопросов важно для электродинамики искусственного облака прежде всего потому, что в сильно-неравновесных состояниях плазмы (например, со значительной кулоновской неидеальностью) могут существенно изменяться выражения для электрических параметров, фигурирующих в уравнениях динамо-эффекта.

Основой анализа, проводимого в данной главе, является уравнение непрерывности для заряженных частиц в быстро расширяющемся облаке слабоионизованного газа:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \text{div}(N \mathbf{v}_e) = - \frac{N_0}{\tau} \left(\frac{N}{N_0} \right)^\kappa \left(\frac{n}{n_0} \right)^{\tilde{\kappa}} \left(\frac{T_0}{T} \right)^\eta \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{\tilde{\eta}}, \quad (8)$$

где N и n – концентрации заряженных частиц каждого знака и нейтральных частиц, соответственно; T – температура тяжелых частиц (т.е. ионов и нейтралов), T_e – температура электронов, \mathbf{v}_e – поле скоростей заряженных частиц; κ , $\tilde{\kappa}$, η и $\tilde{\eta}$ – параметры, характеризующие лидирующий канал



рекомбинации, а τ – характерное время, выражаемое через коэффициент рекомбинации для этого канала. Подчеркнем, что параметризация скорости потери заряженных частиц выражением в правой части уравнения (8) позволяет охватить практически любой из известных каналов рекомбинации электронов с достаточно простыми положительными ионами; она неприменима лишь в случае сложных молекулярных и отрицательных ионов.

Далее, в данной главе диссертации проведен детальный анализ и классификация возможных типов временного поведения концентрации и температуры заряженных частиц в облаках различной конфигурации (например, при разлете немагнитной плазмы, замагнитной плазмы, приводимой в движение свободно расширяющимся нейтральным газом, и т.д.). Наиболее интересной из изученных является, по-видимому, динамика параметра кулоновской неидеальности $\Gamma_e^* = (e^2 N^{1/3}) / (k_B T_e)$, т.е. отношения характерной кулоновской энергии межчастичного взаимодействия к кинетической энергии частиц. Четыре качественно различных типа временного поведения этой величины проиллюстрированы на рисунке;¹ они соответствуют следующим интервалам параметров:

- I: $\nu(u_0/R_0) > 1/\tau$, $\xi^* < \nu(\kappa - 1)$;
- II: $\nu(u_0/R_0) > 1/\tau$, $\xi^* > \nu(\kappa - 1)$;
- III: $\nu(u_0/R_0) < 1/\tau$, $\xi^* < \nu(\kappa - 1)$;
- VI: $\nu(u_0/R_0) < 1/\tau$, $\xi^* > \nu(\kappa - 1)$.

¹ Формальное возрастание Γ_e^* до бесконечности возникает здесь из-за использования формул идеального газа. Фактически же, как показано в следующей главе, при учете эффектов сильного межчастичного взаимодействия значение Γ_e^* должно стабилизироваться на уровне порядка единицы.

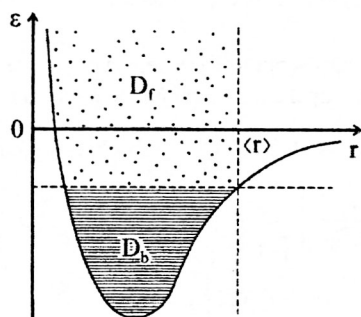
Здесь, $\xi^* = \tilde{\nu}[(\gamma-1)\eta - \tilde{\kappa}] + \nu[(2/3)\tilde{\eta} - \kappa + 1] + 1$, γ – эффективный показатель адиабаты для тяжелых частиц, R_0 и u_0 – как и в предыдущей главе, начальный размер и скорость плазменного облака, ν и $\tilde{\nu}$ – геометрические факторы разлета для заряженных и нейтральных частиц ($\nu = 1, 2, 3$ соответствуют облаку цилиндрической формы, расширяющемуся вдоль оси; цилиндрическому облаку, расширяющемуся вдоль радиуса, и сферическому облаку, расширяющемуся во всех направлениях).

Важно отметить, что режим с неограниченным нарастанием Γ_e^* реализуется, в частности, при разлете незамагниченного плазменного облака ($\nu = \tilde{\nu} = 3$), рекомбинация в котором происходит за счет двухэлектронных столкновений $A^+ + e + e \rightarrow A + e$ (при этом $\tau \approx t_e^{1/2} (k_B T_{e0})^{9/2} / (e^{10} N_0^2)$, $\kappa = 3$, $\tilde{\kappa} = \eta = 0$, $\tilde{\eta} = 9/2$). Этот канал рекомбинации весьма типичен для активных плазменных экспериментов в ионосфере Земли. С физической точки зрения возрастание Γ_e^* связано с тем, что при вышеупомянутых соотношениях между параметрами плазмы убывание кинетической энергии частиц происходит значительно быстрее, чем их потенциальной (кулоновской) энергии. В результате, через некоторое время эти две энергии становятся сопоставимы друг с другом.

Таким образом, основной вывод, вытекающий из материала данной главы, состоит в том, что при рассмотрении электродинамики искусственного облака на самой ранней стадии разлета необходимо уделять внимание возможному переходу ионизованных компонент газа в состояние с сильной кулоновской неидеальностью. При этом выражения для коэффициентов электропроводности и других электрических характеристик плазмы будут существенно отличаться от их “классического” вида.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке методики расчета параметров плазмы в состоянии с предельно сильной кулоновской неидеальностью.

Прежде всего, следует отметить, что наиболее известные методы расчета свойств неидеальной плазмы не вполне адекватны в рассматриваемой нами ситуации, так как они разрабатывались для случая плотной плазмы, когда основной вклад в энергию взаимодействия между частицами создается короткодействующими силами, а кулоновские эффекты играют лишь роль поправки к ним. В отличие от этого, плазма, генерируемая при взрывной инъекции в космическую среду, почти сразу же переходит в сильно разреженное состояние, когда любыми короткодействующими си-



лами (а также квантовыми эффектами) можно с хорошей точностью пренебречь; так что вся потенциальная энергия является кулоновской.

Для описания такой системы мы использовали следующую модель. Предполагалось, что каждый из электронов большую часть времени движется в потенциальной яме, создаваемой ближайшим ионом, которая представляет собой суперпозицию кулоновского и центробежного потенциалов:

$$U_{\text{eff}}(r) = \frac{1}{2} \frac{M^2}{m_e} \frac{1}{r^2} - \frac{e^2}{r}, \quad (9)$$

как изображено на рисунке.

Время от времени эти электроны перескакивают из одной потенциальной ямы в другую за счет возмущений со стороны “внешних” частиц. Предполагается, что эти перескоки могут быть описаны как возбуждения за счет взаимодействия с “термостатом”, ассоциируемым со внешними частицами и характеризующимся некоторой температурой T_{eff} . Таким образом, для построения эффективной функции распределения электрона в поле (9) необходимо знать два ключевых параметра – средний угловой момент электрона M и эффективную температуру T_{eff} .

Что касается углового момента, то его временная эволюция, вообще говоря, должна описываться некоторым кинетическим уравнением, учитывающим как медленные вариации M за счет внешних многочастичных взаимодействий, так и скачкообразные изменения при перескоке из одной потенциальной ямы в другую. На сравнительно небольших интервалах времени от момента перехода плазмы в сильно-неидеальное состояние, ввиду адиабатичности углового момента, можно считать его просто константой, равной $C_M e m_e^{1/2} N_*^{-1/6}$, где C_M – коэффициент порядка единицы, а

N_e — концентрация заряженных частиц в момент, когда плазма стала сильно неидеальной.

Для вычисления эффективной температуры будем исходить из многочастичной функции распределения наиболее общего вида:

$$f(\mathbf{r}_{e1}, \dots, \mathbf{r}_{eN}, \mathbf{r}_{i1}, \dots, \mathbf{r}_{iN}, \mathbf{v}_{e1}, \dots, \mathbf{v}_{eN}, \mathbf{v}_{i1}, \dots, \mathbf{v}_{iN}) = \\ = A_f \exp \left\{ -\frac{1}{k_B T_{\text{eff}}} \left[\sum_{j=1}^N \frac{1}{2} m_e v_{ej}^2 + \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} m_i v_{ij}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + U(\mathbf{r}_{e1}, \dots, \mathbf{r}_{eN}, \mathbf{r}_{i1}, \dots, \mathbf{r}_{iN}) \right] \right\}, \quad (10)$$

где A_f — нормировочная постоянная, \mathbf{r}_e и \mathbf{r}_i — координаты электронов и ионов, \mathbf{v}_e и \mathbf{v}_i — их скорости, а m_e и m_i — массы.

Из-за очень сложного вида потенциальной энергии U в режиме сильного взаимодействия функция распределения (10), вообще говоря, не представляет практического интереса для вычислений. Исключение составляет лишь нахождение средних значений величин, зависящих только от скорости, так как при этом интегралы по координатам, включающие потенциальную энергию, автоматически сокращают друг друга. В частности, среднее значение кинетической энергии в расчете на одну частицу оказывается равным $\langle k \rangle = (3/2) k_B T_{\text{eff}}$ при любой интенсивности межчастичного взаимодействия. В принципе, этот результат хорошо известен в физике жидкостей, однако нам не известны случаи его применения в физике плазмы. Между тем, как раз в случае плазмы можно сделать еще один важный шаг, а именно использовать тот факт, что энергия чисто кулоновского взаимодействия является функцией однородной по Эйлера. Тогда, предполагая эргодичность системы (т.е. равенство средних по ансамблю средним по времени), кинетическая энергия легко выражается через потенциальную по теореме вириала: $\langle k \rangle = \overline{k} = (1/2) |\overline{u}| = (1/2) |\langle u \rangle|$; а последняя очевидным образом оценивается из чисто геометрических соображений: $|\langle u \rangle| \approx e^2 / \langle r \rangle$, $\langle r \rangle \approx 1/N^{1/3}$.

Таким образом, в режиме сильной кулоновской неидеальности эффективная температура системы заряженных частиц оказывается зависящей лишь от их концентрации:² $k_B T_{\text{eff}} = (1/3) (C_u/C_r) e^2 N^{1/3}$, где C_u и C_r — безразмерные коэффициенты порядка единицы, определяемые многочас-

² Эта зависимость, теоретически предсказанная в наших работах [9-11], была с хорошей точностью подтверждена в недавнем эксперименте [R.S. Fletcher, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, v.99, p.145001 (2007)].

тичными корреляциями. При этом эффективная одночастичная функция распределения электрона в переменных “радиус–энергия” принимает вид:

$$F(r, \varepsilon) = A_F \exp \left\{ -\frac{3(C_r/C_u)}{e^2 N^{1/3}} \varepsilon \right\} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon - U_{\text{eff}}(r)}}, \quad (11)$$

где A_F – нормировочная постоянная, r изменяется в интервале от 0 до $\langle r \rangle$, а область допустимых значений ε лежит над кривой $U_{\text{eff}}(r)$.

Функция распределения (11) может быть использована для вычисления различных характеристик сильно-неидеальной плазмы. Так, например, интегрируя $F(r, \varepsilon)$ по областям D_f и D_b (см. рисунок), получаем вероятности нахождения электрона в свободном и квази-связанном состоянии, соответственно. Приближенные аналитические оценки этих интегралов дают для относительной концентрации свободных носителей заряда следующее выражение:

$$\frac{N_f}{N} \approx \frac{3 \exp(3/C_u)}{2\pi C_u^2 \mu_0^{3/2}} \left(\frac{N_*}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{3}{2C_u^2 \mu_0} \left(\frac{N_*}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (12)$$

при $(N/N_*) \ll 1$; где μ_0 – постоянная порядка единицы. Видно, что резкое падение концентрации свободных зарядов по мере расширения облака может служить еще одним (наряду с плазменной турбулентностью) механизмом формирования аномального электрического сопротивления, нередко наблюдаемого в активных космических экспериментах.

В заклучении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Приложение А посвящено обсуждению модели разлета газового шара, которая существенно используется как во второй, так и в третьей главах. Этот материал не претендует на оригинальность и включен лишь для полноты изложения.

В приложение В вынесены достаточно очевидные, но очень громоздкие выкладки, связанные с усреднением многочастичной функции распределения. Их результатом является универсальное соотношение между эффективной (вириальной) температурой системы заряженных частиц и их кинетической энергией, которое играет ключевую роль при выводе эффективной одночастичной функции распределения в четвертой главе.

В приложении С обсуждены условия применимости вириальных соотношений для описания динамики заряженных частиц в сильно-неидеальной плазме. Приведены как качественные аргументы, так и результаты численного моделирования “из первых принципов”. Этот материал вынесен в приложение, так как находится несколько в стороне от основной темы диссертации, однако чрезвычайно важен для нее, поскольку предположение о “вириализации” является основой всех расчетов в Главе 4.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита теория обобщенных сферических функций, предназначенных для решения задачи динамо-эффекта в разлетающемся газовом шаре. Основным достоинством данного метода является возможность легко проследить зависимость генерируемых электрических полей и токов от всех параметров плазмы (в первую очередь, коэффициентов электропроводности). Тем самым, обеспечивается эффективный инструмент для оптимизации активных космических экспериментов, а в перспективе и для радиофизической диагностики плазмы посредством решения обратной задачи динамо-эффекта. Найдены точные решения уравнений динамо-эффекта для конкретных граничных условий.

2. Исследована динамика ионизационно-рекомбинационных процессов в быстро расширяющемся облаке плазмы. При этом установлено, что при определенных термодинамических и кинетических параметрах инжектированного газа возможен переход плазмы в состояние со значительным (порядка единицы) параметром кулоновской неидеальности. Таким образом, возможность существования сильно-неидеальной плазмы на некотором временном интервале вскоре после момента инъекции следует иметь в виду при интерпретации экспериментальных данных.

3. Для оценки электрических параметров плазмы с сильной кулоновской неидеальностью развит приближенный метод построения эффективной одночастичной функции распределения электронов. С использованием этой функции рассчитана концентрация свободных носителей заряда, и выявлено ее резкое уменьшение в процессе разлета плазменного облака. Тем самым, предложено альтернативное объяснение механизма формирования аномального электрического сопротивления плазмы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бадин В.И., Думин Ю.В. Оценки электронной концентрации при выбросе искусственного плазменного облака в ионосферу. // *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1994, т.34, №3, с.24-30.

2. Badin V.I., Dumin Yu.V. Ionization and Recombination Processes Determining Plasma Density at the Initial Stage of Artificial Cloud Injection. // *Adv. Space Res.*, 1995, vol.15, no.12, p. (12)119-(12)122.

3. Думин Ю.В. Использование обобщенных сферических функций для решения сферически-симметричной задачи динамо-эффекта. // *Ж. вычисл. мат. и мат. физ.*, 1998, т.38, №11, с.1900-1906.

4. Badin V.I., Deminov M.G., Dumin Yu.V. On the Electric Currents of an Expanding Plasma Ball. // *Adv. Space Res.*, 1998, vol.21, no.5, p.777-780.

5. Думин Ю.В. Точное решение задачи динамо-эффекта для однородно расширяющегося плазменного шара. // *Прикладная физика*, 1999, №5, с.22-26.

6. Dumin Yu.V. An Exact Solution of a Three-Dimensional Dynamo-Effect Problem in an Expanding Plasma Ball Injected into the Near-Earth Space. // *Problems of Geospace 2*, Wien: Österreichische Akad. Wissenschaften, 1999, p.295-300.

7. Dumin Yu.V. An Exact Solution of Three-Dimensional Dynamo-Effect Problem in Expanding Plasma Ball, Based on Using the Generalized Spherical Functions. // *Phys. Chem. Earth (C)*, 2000, vol.25, no.1-2, p.75-78.

8. Dumin Yu.V. Exact Solution of the Dynamo Problem for a Spherically-Symmetric Plasma Outflow. // *XXV Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases: Proceedings*, Nagoya, Japan: Nagoya University, 2001, vol.2, p.189-190.

9. Думин Ю.В. Концентрация носителей заряда в метастабильной плазме с сильной кулоновской неидеальностью. // *Прикладная физика*, 1999, №5, с.18-21.

10. Dumin Yu.V. Studying the Properties of Supercooled Strongly-Coupled Plasma Created by Artificial Injection into Space. // *J. Low Temp. Phys.*, 2000, vol.119, no.3-4, p.377-383.

11. Dumin Yu.V. Transition of Plasma into a Strongly-Coupled State as a Possible Reason for Anomalous Resistance in Active Space Experiments. // *Phys. Chem. Earth (C)*, 2000, vol.25, no.1-2, p.71-74.

12. Dumin Yu.V. Generation of Supercooled Strongly-Coupled Plasma by Artificial Injection into Space. // *Astrophys. Space Sci.*, 2001, vol.277, no.1-2, p.139-142.

13. Dumin Yu.V. Strongly-Coupled Plasmas Produced by Artificial Ejection into Space. // *XXV Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases: Proceedings*, Nagoya, Japan: Nagoya University, 2001, vol.2, p.187-188.



Подписано в печать 29.10.2008 г.

Печать трафаретная

Заказ № 1064
Тираж: 100 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(499) 788-78-56
www.autoreferat.ru

